

火災加熱を受けた異形P C鋼棒の強度およびその推定法

馬場 重彰・道越 真太郎・小林 裕

Keywords : deformed steel bars for prestressed concrete, fire, repair, high-strength concrete, ultrasonic hardness testing, non-destructive testing

異形P C鋼棒, 火災, 補修, 高強度コンクリート, 超音波式硬さ試験, 非破壊検査

1. はじめに

鉄筋コンクリート部材のせん断補強筋には高強度の細径異形P C鋼棒（以後、異形P C鋼棒と表記）が使用される場合がある。異形P C鋼棒は調質鋼であるため、普通鉄筋より低温域から火災後の特性変化が生じるおそれがある。そこで、火災後の構造体の再使用可否の判断資料を得るために、高温履歴を受けた異形P C鋼棒の引張試験を実施した。また、部材の被害度を原位置で手軽に評価できる手法として異形P C鋼棒の加熱後の硬さに基づく受熱温度および残存強度の推定法を提案した。

2. 試験方法

試験変数は火災の規模とする。その指標として、IS0834の火災継続時間（等価火災時間）を採用し、想定する等価火災時間を30, 60, 90, 120, 180分の5水準とする。まず、代表的な高強度鉄筋コンクリート柱の断面として、図-1に示す柱幅900mm、主筋12-D41 (pg=1.99%)、帯筋U12.6@100 (pw=0.55%)、かぶり40mmの断面を仮定する。次に、2次元の差分法熱伝導解析を行い、断面内の温度分布を求める。そして、その温度履歴を異形P C鋼棒試験片に与え、常温まで戻した後にJIS Z 2241（金属材料引張試験方法）にもとづく引張試験を行う。試験片にはひずみゲージを貼付し、応力-ひずみ関係を取得する。なお、測定項目は、降伏強度（または0.2%耐力）、引張強さ、破断伸びである。

3. 加熱温度の設定

熱伝導解析によって求めた帯筋、主筋および断面中心位置（図-1参照）の最高温度を表-1、熱伝導解析結果の一例（等価火災時間180分）を図-2に、帯筋の時刻歴を図-3に示す。熱伝導解析に使用した熱定数（熱伝導率、比熱および比重）は、高強度コンクリートを使用した柱

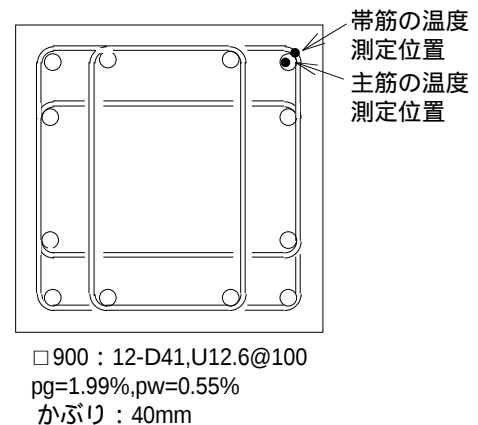


図-1 高強度鉄筋コンクリート柱の仮定断面

Model cross-section of high-strength RC column

表-1 最高温度結果

Maximum temperatures obtained from analyses

等価火災時間 (分)	帯筋 (℃)	主筋 (℃)	断面中心 (℃)
30	273	187	32
60	421	290	45
90	540	368	68
120	635	437	82
180	776	558	119

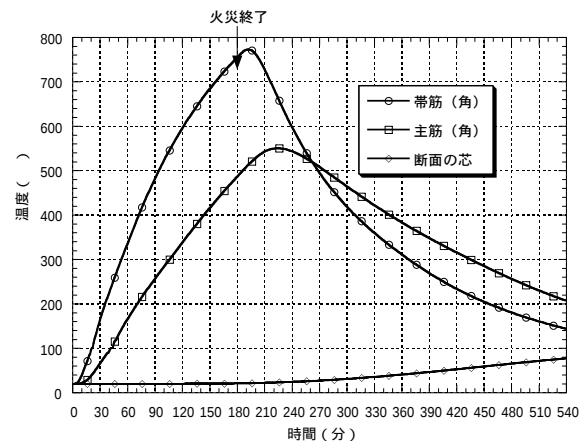


図-2 熱伝導解析結果（等価火災時間180分の場合）
Analytically estimated temperature time histories

の載荷加熱実験の温度結果と合うように調整した値を採用した。

試験片は電気炉を用いて加熱し、加熱温度は図-3に示す温度履歴を設定した。熱伝導解析から得られた設定温度と試験片の測定温度の一例を図-4に示す(等価火災時間60分の場合)。すべての試験片において、昇温時の温度制御は比較的精度良く実施できた。

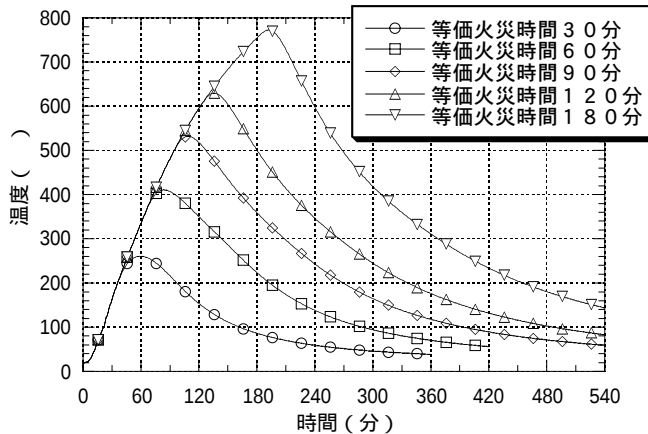


図-3 帯筋位置での熱伝導解析結果の時刻歴
Time histories at hoop location

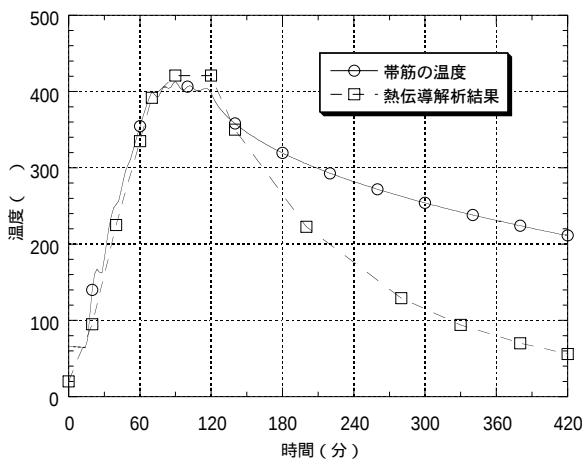


図-4 設定温度と試験片温度の比較(等価火災時間60分)
Measured vs target furnace temperatures

4. 高温履歴を受けた鋼棒の引張試験

応力-ひずみ関係を図-5に、耐力、引張強さおよび破断伸びと受熱温度の関係を図-6に示す。

引張試験結果より、等価火災時間30分(電気炉最高温度280℃)までの加熱であれば0.2%耐力、引張強さおよび破断伸びは常温とほぼ等しいことが分かる。しかし、等価火災時間60分(試験片温度413℃)以上では、0.2%耐力および引張強さともに低下し、破断伸びには増加が認められる。

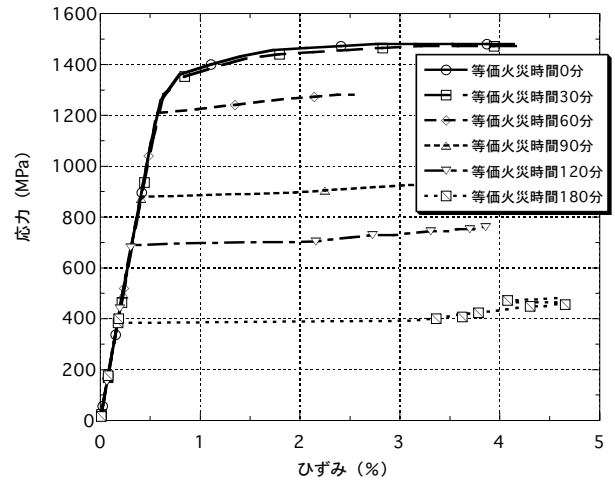


図-5 応力-ひずみ関係
Stress-strain relationships on equivalent heating conditions

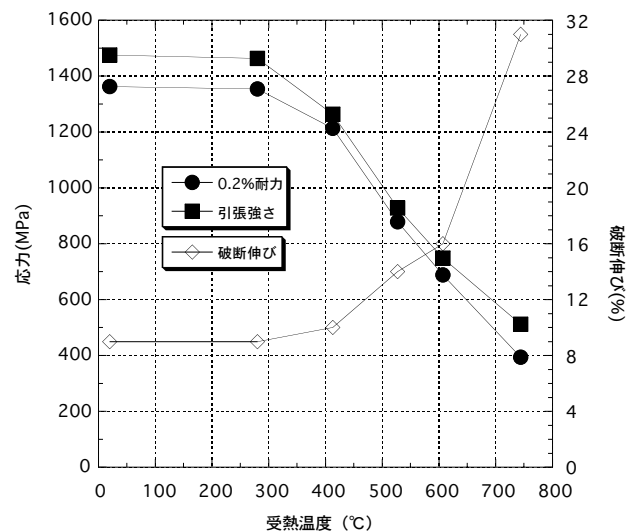


図-6 受熱温度と機械的性質の関係
Strengths and hardness after heating

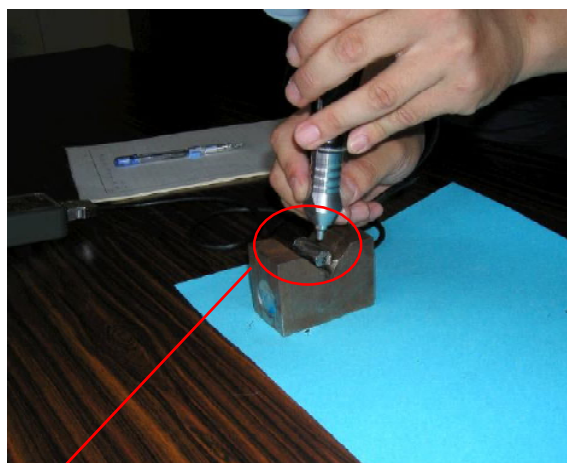
0.2%耐力の低下率(常温時耐力に対する比率)は等価火災時間30分で0.99、等価火災時間60分で0.89、等価火災時間90分で0.64、等価火災時間120分で0.50、等価火災時間180分で0.29であった。引張強さの低下率は0.2%耐力の低下率とほぼ同等であった。

5. 火災後における異形P C鋼棒の機械的性質の推定法

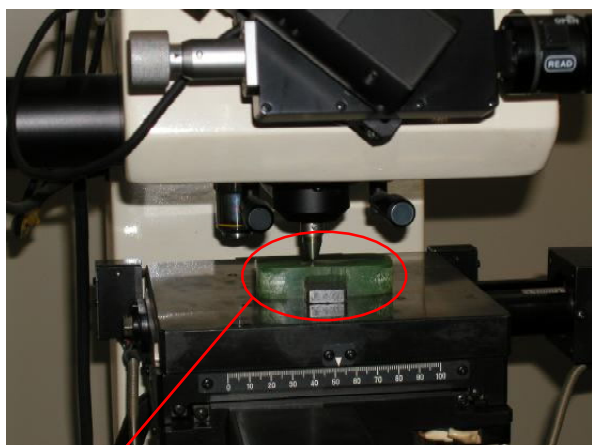
一般に鋼材の強度と硬さには相関関係があることが知られている。そこで、火災現場での原位置測定が可能な携帯型の簡易硬度計を使用して、電気炉で加熱後の異形P C鋼棒のビッカース硬さ測定を実施し、硬さと受熱温度および加熱後の機械的性質の相関関係を調べた。



写真-1 超音波式簡易硬度計
Ultrasonic hardness tester



試験片
写真-2 超音波式硬さ試験風景
Hardness testing using ultrasonic tester



試験片
写真-3 JIS式硬さの試験風景
JIS-based hardness measurement

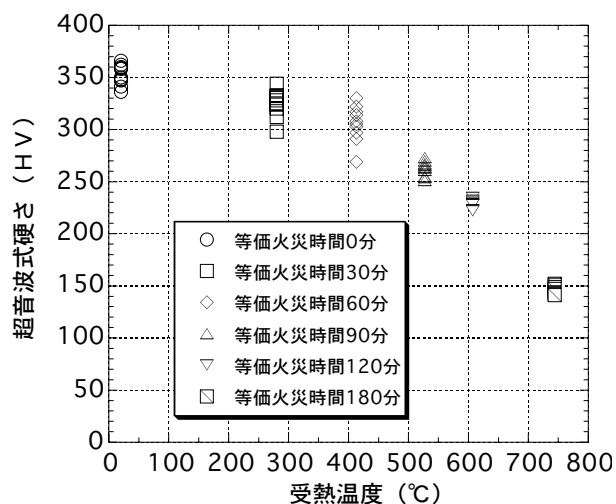


図-7 受熱温度と超音波式硬さの関係
Hardness vs maximum temperature experienced

硬さの測定には超音波式簡易硬度計(クワットクレマー社製、試験荷重 50N)を使用し、ペーパーサンダーで研磨した試験片表面のビッカース硬さ(以後、超音波式硬さと表記)を得た。この硬さ試験機は、超音波の共振周波数変化から硬さ値を読み取る方法を採用している。超音波式簡易硬度計を写真-1に、試験風景を写真-2に示す。試験では、各々の供試体につき10点測定した。超音波式硬さと受熱温度の関係を図-7に示す。超音波式硬さは受熱温度の上昇とともに徐々に低下し、常温時の平均値は353HV、等価火災時間30分で325HV、等価火災時間60分で305HV、等価火災時間90分で263HV、等価火災時間120分で230HV、等価火災時間180分で146HVであった。測定結果のばらつきは常温、等価火災時間30, 60分の測定結果の方が、等価火災時間90, 120, 180分のものと比較して

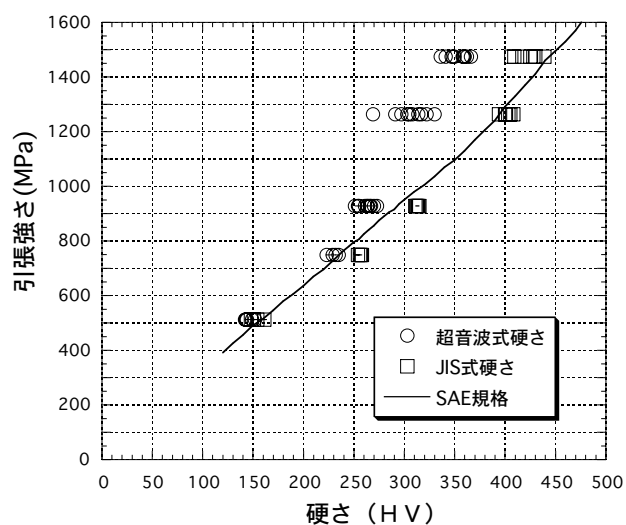


図-8 硬さと引張強さの関係
Hardness vs tensile strength

大きかった。

次に、硬さと引張強さの関係を図-8に示す。同図には超音波式硬さの他に、鋼の硬さ標準であるSAE規格および異形P C鋼棒を切断し、その断面を機械研磨した後にJIS Z 2244 ビッカース試験により測定したビッカース硬さ（以後、JIS式硬さと表記）もあわせて示している。JIS式硬さの試験風景を写真-3に示す。超音波式硬さとSAE規格値を比較すると、等価火災時間90分までは超音波式硬さの方が小さく、等価火災時間120, 180分ではほぼ同一の値を示した。なお、JIS式硬さとSAE規格値とは、概ね一致していた。

6. まとめ

本試験結果より、以下の結論を得た。

- 1) 異形P C鋼棒の加熱冷却後の引張試験を実施し、その機械的性質を把握した。等価火災時間60分（試験片温度413℃）以上では、0.2%耐力および引張強さともに低下し、破断伸びには増加が認められた。
- 2) 超音波式硬さと受熱温度、0.2%耐力、引張強さには相関が認められる。
- 3) 超音波式硬さを測定することで、部材から異形P C鋼棒を切り出すことなく受熱温度、0.2%耐力、引張強さなどの推定が可能である。